

# 最近の電子計算機技術\*

後藤 英一\*\*

電子計算機が世界ではじめて作られましたのは1946年ですから、いまから15年前になります。それから現在まで御承知のように計算機は非常な勢いで進歩してまいりました。しかしながら、この計算機あるいは数値計算を機械でやらせるという考えそれ自身は、決して新しいものではないと思います。紀元前2000年からあるというソロバンは簡単すぎてこれは計算機のうちにはおそらく入れられないと思いますが、17世紀の数学者パスカル、ライプニッツも計算機に興味をもっていました。

パスカルはソロバンとは違って桁上げが自動的にいく加算機を作りました。それからライプニッツはこのパスカルの計算機を改良し、加え算を繰り返してやるようにして掛け算ができる機械を作ったのです。

このパスカルやライプニッツが考えました計算機に3世紀に亘りまして、いろいろと改良が加えられたものが今日の卓上計算機、あるいは電動計算機なのであります。パスカルやライプニッツがどんな理由から計算機に興味を覚えたのかは知りませんが、数値計算というのは、非常に簡単な規則に従って行なわれるのですから、これを機械にやらせようということは古くから多くの人が考えたようであります。さらにライプニッツは数値計算のみならず、人間の論理的思考過程も機械化できるはずだという思想をもっていたらしいのですが、当時はこれを実現する手段はありませんでした。

ライプニッツが今日の計算機による数学上の定理の証明を見たらば、これこそ自分の思想を具象化したものに外ならぬと主張することでしょう。

19世紀にはすでに働きの上では、今日の電子計算機とほとんど同一なものと考えた人があります。それはイギリスの数学者のパベッジです。

要するに数値計算というのは、数値を次々に呼び出して、これに一定の規則に従って四則演算を行なえばよろしいわけですから、このように規則が明確な仕事

は、機械で当然できるはずだとパベッジは考えたのであります。そしてイギリス政府からも研究費をもらいまして、その機械、アナリティカルエンジンとディフェレンシャルエンジンを作ろうと一生努力したのですが、とうとううまくゆかずに終わりました。

今日イギリスの博物館には、このパベッジの作った機械の部分品が陳列されているそうです。パベッジが彼の機械に使おうとした計算方法は、今日の電子計算機のものとはほとんど同じなのでありますが、ただ当時はいまのエレクトロニクスがなかったですから、それを実現する手段としては純機械的な歯車でありますとか、ラチェットでありますとか、というようなものを使わざるを得なかったのであります。

純機械的な機構では、適当な増幅機構がなかなか得られないので、このためにどこか一つの場所から他の場所へ数を移すような操作をしようとしたしますと、摩擦による力に打ち勝つことがむずかしくて、うまくゆかなかつたんだらうといわれています。

こんなわけで、計算機の実現のためには計算の方法のみならず、これを実現する裏づけになります科学技術の全体的な進歩が非常に重要なわけであります。

パベッジから、最初の電子計算機 ENIAC までには大体100年たっておりますが、パベッジはマックスウェルとかファラデーと同じ時代の人です。その頃は電磁現象が始めてみつかった時代でありますから、真空管はもちろんありませんし、継電器はおろかモーターも発電機さえもまだありませんでした。したがって電磁現象を計算機に応用することなどは全く考慮外だったので、ところが ENIAC になりますと、これには100年間にわたる科学技術の進歩の成果が採り入れられています。

真空管による増幅というのは、もちろん確立した技術になっておりました。また ENIAC は戦時研究で弾道の計算に使おうとして作った計算機であります。ちょうど第二次大戦中にレーダーに関連して、パルスを取り扱う技術が大変進歩したので、ENIAC にはこのパルス技術がふんだんに利用されました。

このように技術の総合的な進歩の成果に基づきまし

\* Recent Techniques in Electronic Digital Computers, by Eiichi Goto (Faculty of Science, University of Tokyo)

\*\* 東京大学理学部 情報処理学会第2回通常総会特別講演

て、電子計算機が作られるようになったわけです。今日計算機に関連する技術は、非常な勢いで進歩し続けておまして、最初の電子計算機 ENIAC が作られてから 16 年しかたっておりませんが、計算機の技術はすっかり一変してしまっただけでもいまいくらいい変っております。たとえば ENIAC には 18000 本という真空管を使っており、これはいままで作られた電子計算機のすべてのもののうちで、真空管の数では最高ではないかと思えます。

なぜこんなことになったかと申しますと ENIAC にはいまとは違って記憶装置がなく、しかも計算機構には卓上計算機の計数輪 1 個 1 個をそのまま、10 組の真空管フリップ・フロップで置き直したような方式が使われたからなのです。特別な記憶装置がないので、弾道計算に必要な 10 進法 10 桁の数字 20 組を記録するのに全部真空管が使われました。

しかし、このような不経済な方法が使われたのは、ENIAC が最初でまた最後でありまして、それ以後に作られた電子計算機には、電子計算機のために新しく開発された記憶装置が使われるようになり、また真空管などを使う計算回路の構成法も改善されて ENIAC よりはるかに少ない個数の能動素子（真空管）を使って、しかも計算速度と記憶容量の点では ENIAC をはるかに凌駕するものが作られるようになりました。

計算機はこのように、計算機独特の技術が発展されて進歩してきたのですが、この過程をふり返ってみますと、初期の頃は既知の技術の組み合わせが多かったように見受けられます。たとえば、水銀超音波遅延路線は、最初に現われた電子計算機用の記憶装置であります。超音波遅延路線による記憶装置はレーダーに使うために研究されたものを転用したものです。

次にはブラウン管記憶装置が広く使われた時代がありました。このブラウン管は、螢光面の一様性の点では電子計算機用ということを考慮して作られてはいますが、記憶装置全体としては標準的な真空管電子回路と考えられます。

これと比べると今日新しく作られている電子計算機には能動素子としてトランジスタ、日本ではパラメトロン、また記憶装置には矩形ヒステリシスを持つ磁気コアを使うものが大部分を占めていますが、これらはいずれも電子計算機の誕生当時には全く存在していなかったもので、10 年に満たないわずかの期間の間に、計算機に使われている素子は全部変わってしまったこと

になります。

いまから 10 年先の計算機には何が使われるようになるかを明確に予想することは非常に難かしいことですが、今日の計算機とは全然違った素子と製造技術が使われるようになることも十分にありうるのです。

現在、計算機に使える可能性があるとして研究されている新しい素子を見ますと、いままでエレクトロニクスに應用されたことのない現象を新たに應用しようとするものが非常に多いように見受けられます。

電子計算機の発展の初期の段階では、古くからある既成の技術の組み合わせが大変有効でした。つまり、最初のうちは計算機そのものが全く新しくだったので、だれでも古い既知なものの組み合わせで新しい技術が次から次へと生み出させたのです。しかしある程度まで古いものを組み合わせるといことをやってしまうと、もうやり残された組み合わせがあまりないところまでできます。そこで当然新しい技術を生み出すには、新しい原理とか現象を導入しなくてはならなくなります。これが計算機の現状だと思われま。

たとえば超伝導という現象は、半世紀も前から知られていて、純学問的興味から多くの物理学者によって非常に盛んに研究されてきましたが、それを Electronics の技術に使用しようとした人は、最近まで全然いなかったのです。それがいまから 6 年ばかり前に、バックがこれを計算機に應用することを考えました。すなわちクライオトロンです。4 年ばかり前になりますが、薄い PN 接合を通してのトンネル効果によって、負抵抗が現われるという新しい物理的現象を江崎さんが発見されました。これが計算機の関係者によっても取りあげられまして、盛んに研究されるようになったのがエサキダイオードまたは別名トンネルダイオードに他なりません。

このように見ますと、将来の計算機の新しい技術では、その関連する分野がこれまでよりはるかに広い分野にわたってきて、基礎科学から計算機回路さらに製造技術にわたるまでの協力がその発展のために絶対不可欠になってきているのです。

江崎さんが、大量の不純物を含むゲルマニウムの p-n 接合で負抵抗が現われるという新しい現象を発見されたのは 1957 年のことです。江崎さんはこの現象の発見のみならず、これがトンネル効果によって起るとい理論的説明をも与えられたのです。

トンネル効果は、古典力学では出てこない純量子力

学的な効果であります。ここに電位の山がありましてその一方から電子がやってきたとしますと、電子の運動エネルギーの大きさが、山を越すだけの大きさがないと向う側へ通り抜けられないというのが古典力学的な考え方ですが、量子力学的に考えますと、電子というものは粒子性と波動性と両方性質を持っています、その波動性が表われますと、ごくわずかですが、山の中を滲みとおって山の向う側に通り返られるのです。これはちょうど汽車が高い山を通り抜けるのに、トンネルを通るといふのに似ているのでたしかガモフだと思いますが、このような現象にトンネル効果という名前をつけました。

大量の不純物を含むゲルマニウムの薄い p-n 接合では、このトンネル効果が支配的になって負抵抗が表われるという点が江崎さんの発見です。大変残念なことでありますが、私も日本の計算機の金物屋が不勉強であったため、江崎さんがこの現象を見つけないが、この現象の本質な点をどのくらい高い周波数まで使えるかという点を十分に考慮して、これを本格的に取上げた人は日本にはいなかったのです。

アメリカあたりになりますと、何か計算機に使えそうな新しい現象はないかと鶴の目鷹の目でたえず探し求めている人が大勢おります。

負抵抗が表われる、増幅ができる可能性があるという江崎さんの論文が *Physical Review* に出るやいなや GE, RCA と Bell 研究所などでその研究が始められました。負抵抗を示す現象や素子には多くのものが知られていますが、この新しい負抵抗素子エサキダイオードの原理について調べてみますと、それまでに知られていたどんな負抵抗素子あるいはもっと広くトランジスタや真空管も含めてどんな増幅素子よりも高い周波数で、高速度に働くことがわかったのです。

比較のために接合形トランジスタでは何でその上限の周波数が決っているかを見ますと、トランジスタは半導体で作られた PNP または NPN のサンドイッチ状の構造をしていて、サンドイッチの真中にはさみまますチーズとハムに当ります中央のベースの部分の厚さで、この周波数がきまります。これが薄ければ薄いほど高い周波数まで使えるのですが、これをある限度以下に薄くすることは技術的にも原理的にも非常に難しく、大体 1,000 Mc が限界になっています。

一方エサキダイオードは、トンネル効果という全然違う原理を使うものですから、ベースの部分を薄くす

るというような技術的困難がなく、しかもいままでのところ、負抵抗が消えるまで実験された例がないのですが、大体  $10^{11}$ c/s (100,000 Mc) 波長にいたしまして、3 cm ぐらいいまで十分負抵抗の特性は失われなだろうと考えられています。このエサキダイオードの基本原理上の特長は、アメリカの研究者によって明かにされました。

トランジスタの限界周波数が行きづまってきた時でしたから、アメリカの新聞の中には、今後のエレクトロニクスはすべてエサキダイオードになるというようなことを熱狂的に書いたものがあつたくらいです。今日ではもちろんその頃のような熱狂的な騒ぎはありませんが、このエサキダイオード施風は、多量の不純物を含む半導体とかトンネル効果の研究を大いに促進した事実も重要でありまして、その種の研究は現在特にアメリカが盛んであります。

現在日本では、エサキダイオードの応用回路関係の研究の数はかなり多いのですが、いまいったトンネル効果あるいは不純物を大量に含む半導体という基礎的研究を行なっている研究者の数は、アメリカとは数にならないほど少ないようです。

エサキダイオードを使う計算機の研究は、かなり進んできましたが、まだ実用にはなっていません。技術上の問題としては、まずエサキダイオードは2端子素子であるということがあります。トランジスタですと三つ足があり、ベースから信号を入れてやればコレクターに増幅された信号が出てくるが、逆には信号が伝わらないという非常に都合のよい性質があります。これに比べてエサキダイオードは、2端子しかないのでそのうち1本はアースいたしますと、1本しかないことになります。ですからこの1本から信号を入れて、それから信号を取り出さなければならないということになり、これは入ってくる信号と出て行く信号とを区別して、一方向だけに信号を伝える上に障害となります。

この障害は、パラメロンで使いました3拍動振とかその他適当な方法で、方向性を与えることによって取り除くことができますが、もう一つの大きな問題は安定度と増幅度が両立しないことです。これはどうということかと申しますと、いままでいろいろの回路が考えられていますが、そのいづれでもエサキダイオードを計算機の中で信号の増幅に使いました場合、ダイオードの特性、電源電圧あるいは回路部品の抵抗値など

が非常に精密にできていればいるほど、増幅度を上げることができるのですが、逆に増幅度を大きくしておきますと、これらの値がわずかでも変ると増幅度が非常に変わり、回路全体の安定度が著しく害われます。このため一つのダイオードで大きな増幅度を取ることができませんから、たくさんのダイオードを増幅に従って多段増幅する必要があります。こうしますと回路の構成要素数が非常にふえて、しかも信号の遅れもふえます。

R.C.A. の人は「エサキダイオードは使いよいものではないが、とにかくいまのところこれより早いものはないのだから使わなければいけない」といっていますが、これは現在のエサキダイオード計算機の研究の実状を適切に表わしています。

エサキダイオードのスイッチング速度は、いまのところ能動的（増幅できる）な素子としては、他のどの素子よりも速く、トランジスタに比べて少なくとも20倍、多くみて100倍のスピードがあり、これがエサキダイオードの最大の特徴であります。メサトランジスタの進歩によって数十 Mc までのクロック周波数の計算機までは、使いなれたトランジスタ回路で十分作れると考えられますから、エサキダイオードがその真価を発揮するのは100 Mc 以上のクロック周波数ということになります。

日本で今日作られている計算機では、クロックは、200 kc くらいの段階ですから、それと比べると正真正銘の1,000倍速いものが目標ということになります。R.C.A. で試作した回路は、まだエサキダイオードをわずか10数個使った1段の2進計数回路に過ぎませんが、クロックは450 Mc です。

450 Mc というような速いクロックを持つ回路になりますと、重大な問題は、信号の伝わる速さであります。450 Mc といえますと、真空中で67 cm の波長となります。この回路には3拍動振ダイオード対方式が使われているので、信号が一つのエサキダイオードから出て次のエサキダイオードに行き、そこで多数決論理演算が完了するためには、450 Mc のさらに3倍の速さが必要なのです。450 Mc の3倍1,350 Mc の速さになると、波長が23 cm くらいになってしまいます。

この試作回路では、10個あまりのエサキダイオードからできている回路を約1インチ(3 cm)四方に全部入れてしまっているからよいのですけれど、もしかり

に数千個のエサキダイオードを使う計算機が普通の机ぐらいの大きさに作れたとした場合、その端から端へ信号を送るのに1,350 Mc の10倍(233 cm)くらいに相当する時間がかかって、計算速度はエサキダイオードではなく、電線の長さから制限されてしまうことになるでしょう。

このように、信号の伝送の遅れが問題になるので、計算機の超高速化には、同時にその小形化、超小形化が要求されるのです。

計算機技術の改良と研究には、三つの目標があります。それは計算速度の向上と計算機の小形化および新しい大量生産法によってその価格を下げることです。エサキダイオードは、その中の高速化に有望なわけです。ここで後の二つの問題にふれてみたいと思います。

大量生産と小形化に将来有望と考えられている技術に蒸着法があります。それはどういうことかという一例を申しますと、ガラス板を真空の炉の中に入れ、その上にもものをつけたいところにだけ穴があいているマスクをかけて、所定の物質を蒸着するのです。最初に金属、次に絶縁物というように、次にまた金属と何枚も何枚もの真空の中でのふきつけ操作により回路を作ろうというのです。将来は計算機全体がこんな具合にして作られないかということが考えられています。

この蒸着法に今日の技術の段階で一番適している素子は、クライオトロンです。

クライオトロンというのは、超伝導を利用する素子で、惜しくも若くて亡くなりました MIT のバックが始めたものです。

超伝導というのは、鉛とか錫とかそのほか多くの金属が示す性質で、これらの金属を液体ヘリウムの温度に冷しますと、抵抗が完全に零の状態になります。そこでたとえば、超伝導金属の環に一度電流を流すと、それが永久に流れ続けるので、これを利用して、記憶装置が作られています。また、この超伝導状態で抵抗零の金属にある強さの磁場をかけると、超伝導でなくなり、抵抗が非限値になる性質があります。

クライオトロンとしては、いままでにいろいろな形のものと考えられてきましたが、今日一番研究が進んでいるものは、錫の膜の上に絶縁物を介して鉛がはってあるという形をしています。鉛と錫では、鉛の方が強い磁場まで超伝導性が保存されます。これを利用して鉛の膜に制御電流を流して、錫の膜にかかる磁場を変えて錫の膜の抵抗を零または有限値にスイッチする

のです。この形のもは交叉フィルム形クライオトロンと呼ばれていますが、2種類の金属膜を向い合わせるだけといった簡単な構造で、入力と出力が完全に分離している能動的スイッチ素子が得られるという点がこのクライオトロンの最大の特長でありまして、蒸着技術には一番適しています。

たとえば IBM で発表している例では、普通顕微鏡に使うデッキグラスくらいの大きさのガラス板一枚の上に、135個のクライオトロンを合計17回の蒸着操作で使っています。

IBM の人の話では、いままでいきましたようなものをさらに連続的に15枚作って、100%の良品率だったとのこと。このクライオトロンの鉛と錫および絶縁物である一酸化硅素 (SiO) の膜の厚さは数千オングストロームの程度に過ぎませんから、この蒸着法は計算機の小型化にも極めて有効なのであります。

アメリカの計算機の学会で、将来の計算機という構想の中で IBM の人は次のようにその夢を語っています。将来計算機はこの蒸着技術のようなものが発達して、ちょうど本を印刷するのと同じように簡単にできるようになるだろう。工場的一方からガラスの板が入って行って、そこに鉛とか錫とか必要な物質が次々に蒸着され、しばらくするとむこうから計算機が出てくるというようになるだろう。そして現在では、この部屋がいっぱいになってしまうほどの大きな計算機が、この本1冊くらいにできるだろうということです。ところがそれに対して、そんなに計算機が小さくなってしまったら、故障したときに修理するのに困るのではないかという質問が出ました。その答はその頃になると、計算機はいまの本くらいに安くなっているだろうから、悪いものは紙屑籠に捨ててしまっって新しいものを持ってくればよいだろうということでした。今日ではこれは冗談ですが、いつかはこの夢が実現される日があるかもしれません。

それから次に、超小型化の問題であります。現在多くの試みがなされています。その中で近い将来実用化するかどうかは度外視して、その原理からいって、一番野心的な研究と思われるのは、電子線加工であると思います。ここでこれについて説明しようと思います。

まず、マイクロフィルムという技術を考えてみますと、これは大きな本を保管するかわりに、さきほど中村さんのドキュメンテーションでも問題になることで

すが、写真機によりまして、Information を小さな場所に入れてしまおうということです。ところが、この場合にレンズを置きまして尺度を縮めるという方法には限界がありまして、その限界は何から定めるといふと、それは光を使いますから、光の波長より細かい記録というのは、原理的に不可能であります。ですから可視光線の波長すなわち約1ミクロンが光学的記録法の限界ということになります。

次に電子顕微鏡について考えてみますと、これには光学的顕微鏡を比べると、1,000倍あるいはそれ以上の分解能をもっています。というのはこれは電子線の波長が非常に短いからにははかになりません。

電子顕微鏡というのは、小さな物体に当たった電子線を電子レンズで拡大して、その電子像を観測するわけです。ところが電子レンズを通る電子線の軌道は可逆的ですから、逆に何か大きな物体に電子線を当て、それを電子レンズで逆に縮めてやれば、電子顕微鏡でしか見えないくらい大きな、たとえば100オングストロームくらいの微小な電子像が得られます。

このことは、大分前から方々でいわれていたのですが、最近それをもって本当に物を記録するのに成功した人がおります。ドイツのモランステットという人ですが、彼は1ミクロン四方の中に自分の名前を書きつけました。もちろんそれを読むには電子顕微鏡を使わなくては読めません。

記録方法には、コロジオンの膜に電子線を当てたまましばらくおくと、焦げて炭化することを使いました。この字の大きさは西洋人のことですから、切手1枚の大きさにバイブル1冊が入る細かさだといっております。現在はさらに電子線が当たっている所だけに金属を析出させる方法がないかとか、あるいは電子線があたったところだけ絶縁物を蒸発させてしまう方法はないかとかいうような基礎研究も行なわれています。それがほんとうにうまくできるようになれば、1ミクロンより小さい場所に1個の計算素子を入れることなども可能になってくるでしょう。

さてわれわれが計算機の研究を進めて行く上での一番最終の大目標というのは、人間の頭脳にもっとも近い、あるいは人間の頭脳を凌駕するような計算機を作ろうということだろうと思います。

この大目標についてちょっと考えてみますと、大体人間の頭脳の中には10の10乗、大体100億この脳細胞があるとされております。ですからいまの計算機に

比べますと、いまの計算機というのは大体1万個から10万個くらいの素子を持っているだけで、あんな大きなずう体をしているのですから、その100万倍もの数の素子すなわち脳細胞がわれわれの頭の中に入っているという事実は、今日の計算機の金物屋にとっては、ただ驚異という他ありません。

それからもう一つ問題になるのは記憶であります。計算機では、記憶装置は演算装置にもまして重要なものであります。ところが人間の頭の中では、記憶がどういふふうな機構で行なわれているかは、非常に多くの人によって研究されておりますが、まだはっきりわかっておりません。しかしながらいろいろなことから考えて、人間頭脳の記憶容量は、非常に莫大な量であると考えられています。人によっていろいろ評価が違いますが、大体小さく見積る人でも10の10乗とか12乗とかいっております。そして現在、もしかりに広くいわれております脳細胞と脳細胞の接続部であるスナップスという部分で記憶がなされているのがほんとうだとしますと、大体一つの脳細胞に100個くらいスナップスのついているのが、ざらにあるというんですから、かりに一つのスナップスにかりに5ビットかそれくらいと仮定しますと、大体10の14乗か15乗ビットの記憶量になってしまいます。

一方いまの計算機に、かりにマグネティックのファイルを使ったといたしましても、10の9乗ビットくらいが限度であります。ですから記憶容量では少なくとも10進で5桁くらいのひらきがあると考えられます。

素子の数の方にいたしましても、さきほどいいましたように、100万倍もひらきがあります。一方動作速度だけは現在計算機の方がはるかに優れておりまして、大体人間の脳細胞というのは、一つが動きますのに1 m sec ( $10^{-3}$  sec) くらいかかるということになっておりますが、それに比べますと、すでに実用になっている計算機でも、1マイクロセカンド ( $10^{-6}$  秒) クロックのものはざらでありますし、エサキダイオードなどを使えば1ナノセカンド ( $10^{-9}$  秒) の計算機もできる可能性が出てきたわけでありまして。したがって、動作速度の点だけでは電子計算機の方がはるかに秀れておりますが、素子の数が多いことと、それから記憶量が多いことでは、人間の頭脳の方がまだだんぜん秀れております。数値計算でしたらもちろん計算機の方が秀れておりますが、それ以上の高級な仕事はなかなか今日の計算機ではできず、人間でないとできないと

いう事実の一つの理由は、記憶容量と素子の個数の点で、今日の計算機が頭脳に遠く及ばないためと考えられます。原理的には素子の個数の不足は、計算程度で相当程度補えるはずですが、記憶容量の方は補えません。したがって、今後人間の頭脳により近い計算機を作るといふ目標に対しては、記憶装置の研究が非常に重要であろうと考えられます。

ここで再びクライオトロンの問題に帰りたいと思います。クライオトロンに利用されている超伝導現象は、絶対温度で数度という極低温でないといわれません。この極低温を得るには、現在はヘリウム液化機が使われていますが、これがなかなか問題です。大体ヘリウム液化機は、現在日本では作られていないので輸入してくるよりないのですが、1台のヘリウム液化機が大体1,500万円くらいします。ところが、いまですと、1,500万円出すと小形のものなら、十分電子計算機が1台買えるのですから、これは困ると考えられます。

一方クライオトロンを研究している人にいわせると、ヘリウム液化機は何でもない。たとえば10億円する計算機に1,500万円のヘリウム液化機なんかなんでもないのであります。これはどちらにも一理あります。またもう一つ考慮しなければならないのは、日本ですとヘリウムがなかなか手に入らないという問題があることです。この問題に関連しまして、われわれの家庭の電気冷蔵庫を考えてみますと、その中にはフロンという物質が使われているのであります。おそらくそのフロンが中でぐるぐる回っているということを知って使っている主婦の方は、ほとんどいないと思います。これと同じようにヘリウムを完全に閉じた容器の中で巡環させる極低温槽ができれば、ヘリウムが消失する心配はなくなるはずで。

最近クライオトロン以外に、極低温現象を応用する計算素子がいろいろ考えられています。ごく最近であります。トンネルスターという素子が提案されています。これはアルミニウムのはくを持ってまいりまして、それを空気中に置いとくと、アルミニウムのはくの表面に酸化アルミニウムの薄い膜ができてまいります。さらにその上に鉛などの金属を蒸着しますと、金属-絶縁-金属というサンドイッチになります。ところがこの真中の絶縁物は、非常に薄くてできていて大体10オングストロムくらいのごく薄い膜になりますと、それを通して電子がトンネル効果で通り抜けられるようになります。この現象を利用すると、両側に違う金

属をしておいて、しかも両側の金属が超伝導状態になりますと、エサキダイオードで見られますのと全く同じように負抵抗が現われる。ということが MIT と GE で独立に発見されました。これが計算機に将来使われるようになるかどうかは、今後の研究にまたねばなりません。

クライオサーも極低温の応用素子の一つで、これは液体ヘリウム温度に冷やしたゲルマニウムに電圧をかけると、あの所までくると急に電流が流れ始めて、負抵抗特性を示すことを応用したものです。

このように、バックが極低温現象を計算機への応用すなわちクライオトロンを最初に考えてから、わずか

5年の間に極低温現象の応用が数多く提案されるようになりました。今後もこの方面から多くの計算機素子の候補者が出てくることと思われませんが、極低温現象を応用する計算機の実用性と経済性は、ヘリウム液化機の極低温発生装置の改良に大きく依存している点は特に注目されます。

また、電子計算機の進歩がエレクトロニクスのみならず、極低温工学あるいは電子顕微鏡工学等々の科学の広範な分野に関連するようになってきたことは、その発展初期の幼年期には見られなかった、青年期の一つの特徴と思われます。